
**LASERPISTEAINEISTON JA KUVIO- SEKÄ KOEALAKOHTAISTEN
MAASTOMITTAUSTEN VERTAILU EVON OPETUSMETSÄN ALUEELLA**




Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Metsätalouden koulutusohjelma

Evo, kevät 2014

Jarkko Illman & Jarno Pökälä



EVO

Metsätalouden koulutusohjelma

Metsävarojen suunnittelu ja hoito

Tekijä

Jarkko Illman & Jarno Pökälä

Vuosi 2014

Työn nimi

Laserpisteaineiston ja kuvio- sekä koealakohtaisten maastomittausten vertailu Evon opetusmetsän alueella

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Hämeen ammattikorkeakoulun Evon opetusmetsän alueella suoritetun laserkeilauksen tarkkuutta perinteiseen maastomittaukseen verrattuna. Tutkimus keskittyi tarkastelemaan laseranalyysillä tuotetun puuston tilavuuden suhdetta maastoarviointiin. Vertailu suoritettiin metsikkökuvio- ja referenssikoeala-aineiston perusteella. Työn toimeksiantaja on Hämeen ammattikorkeakoulun opetusmetsä.

Tarkoituksena oli arvioida laserkeilauksella saatavien tulosten laatua käytävissä olevilla tekniikoilla. Tavoitteena oli selvittää näillä tutkimusmenetelmillä saatujen tulosten yhteneväisyys sekä osoittaa virheellisiin tuloksiin johtavia puuston tai maaston ominaisuuksia.

Työn teoriaosuuden pohjana on käytetty Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen tutkijoiden laatimaa tutkielmaa Lasermittaukset metsävarojen hallinnassa. Tutkielman pohjalta on esitetty mahdollisimman havainnollistava kuvaus laserkeilauksesta menetelmänä puuston inventoinnissa.

Kyseessä on laadullinen tutkimus, joka jatkaa Terratec Oy:n ja Pekka Savolaisen ansiokasta laseranalyysin tuotettua puuston mallinnusta Evon opetusmetsän alueella.

Johtopäätöksenä todettakoon, että laserkeilauksessa käytettävät menetelmät antavat melko tarkkaa puuston tilavuustietoa, vaikka ne ovat silti haavoittuvaisia useille talousmetsissä ilmeneville muuttujille. Pääosin nämä kaksi puuston mittaamenetelmää tuottavat hyvin toisiinsa vertautuvaa tietoa. Laserkeilausmenetelmä vaatii kuitenkin edelleen kehitystyötä mahdollisimman tarkan ja luotettavan aineiston saamiseksi.

Avainsanat: laserkeilaus, referenssikoeala, puustotulkinta

Sivut: 25 s.

Evo
Forestry
Degree Programme in Forestry

Author

Jarkko Illman & Jarno Pökälä

Year 2014

Subject of Bachelor's thesis

Comparison between the laser point data and traditional ground measurement in forest of education of Evo

ABSTRACT

This thesis was made to find out the accuracy of laser scanning compared to traditional ground measurement in the area of HAMK University of Applied Sciences forest of education of Evo. The research concentrated on to examine the relation of the volume of growing stock generated with laser analyzing to ground evaluation. The comparison was made based on grove pattern-and reference test area –material. The employer of the research is HAMK University of Applied Sciences forest of education.

The purpose was to assess the quality of the results obtained from laser scanning with available techniques. The aim was to investigate the cohesion of the results made with these research methods as well as to show the features of growing stock or terrain leading to incorrect results.

The theory is based on the research made by University of Helsinki Department of Forest Sciences, named Managing Forest Resources with Laser Measurements. As illustrative as possible description of the laser scanning as a method of growing stock inventory has been presented based on the study.

This is a qualitative research that will continue the excellent work of Teratec Oy and Pekka Savolainen regarding growing stock modeling produced with laser analyzing in the area of Evo educational forest.

In conclusion, it should be noted that the laser scanning methods provide fairly accurate information about the volume of the growing stock, while still being vulnerable to a number of variables occurring in commercial forests. For the most part these two methods of measuring growing stock generate information well comparable to each other. The laser scanning, however, requires further development to achieve the absolute precision and reliability.

Keywords: laser scanning, the reference test area, forest interpretation

Pages: 25 p.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	METSÄNMITTAUS JA ARVIOINTI SUOMESSA	2
2.1	Monilähteinen VMI.....	2
2.2	Metsänmittauksen hyödyt	2
2.3	Metsänmittauksen kehitys Evolla.....	3
3	LASERKEILAUKSEN PERUSTEET	5
3.1	Lasermittausten historiaa.....	5
3.2	Lentolaserkeilauksen tekniikka	6
3.3	Lentolaserkeilauksen edut	6
3.4	Lentolaserkeilauksen kustannukset	7
4	LENTOLASERKEILAUUS METSIEN INVENTOINNISSA	8
4.1	Lasersäteen ja puuston vuorovaikutus.....	8
4.2	Yksinpuintulkinta ja aluepohjainen menetelmä	8
4.3	Pintamallit	9
4.4	Pintamallien luonti	9
4.5	Pintamallien laatu	9
4.6	Piirteiden irrotusyksikkö	10
4.7	Piirteiden valinta	10
4.8	Intensiteetti	11
4.9	Keskimääräisten tilavuustunnusten virhe ja harha (RMSE ja BIAS)	11
5	LASERKEILAUKSEEN PERUSTUVAN METSÄVAROJEN INVENTOINNIN TULEVAISUUS.....	13
6	TUTKIMUSVAIHEET	14
6.1	Kuviokohtaisen puustotulkinnan vertailu.....	14
6.1	Koealakohtaisen puustotulkinnan vertailu	18
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	24
	LÄHTEET	25

1 JOHDANTO

Suomessa ollaan ensimmäisten maiden joukossa koko maailmassa siirtymässä metsäsuunnittelujärjestelmiin, joissa puuston inventoinnissa hyödynnetään lentolaserkeilaukseen perustuvia mittausmenetelmiä. Parhailaan tutkimusasteella oleva maastolaserkeilaus tekee mahdolliseksi entistä yksityiskohtaisemman ympäristötiedon tuottamisen. Laserkeilaus- ja kaukokartoitustekniikan kehitys on mullistanut perinteisen metsänmittauksen ja puustotietojen arvioinnin. Aiemmin puuston arviointi perustui käytännössä täysin maastossa tehtyihin mittauksiin ja niiden perusteella lasketuihin tuloksiin. Tulevaisuudessa ja osin jo nykypäivänä puustonmäärä voidaan arvioida lasermittausten perusteella täysin ilman maastokäyntejä. (Holopainen, Hyyppä & Vastaranta n.d., 3.)

Laserkeilaustekniikan kehitys mahdollistaa metsäalan organisaatioille mitattavat taloudelliset säästöt, sillä maastotöihin tarvitaan jatkossa huomattavasti nykyistä vähemmän henkilöstöä. Lisäksi laserkeilaus mahdollistaa suurten metsäalueiden inventoinnin yhdellä kertaa kun aikaisemmin on totuttu mittaamaan puustotiedot esimerkiksi yhden metsätilan alueelta kerrallaan.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää maastomittauksilla ja laserkeilauksella saatujen tulosten eroja ja niiden syitä Evon opetusmetsän alueella. Käytössämme oli Terratec Oy:n tekemä malli laserkeilaustulosten hyödyntämiseksi ja metsäsuunnittelija Eric Raunion Evon opetusmetsään tekemän metsäsuunnitelman puustotiedot. Edellisten lisäksi hyödynnettiin Evon metsätalousinsinööriopiskelijoiden tekemiä vastinkoealamittauksia koealoilla, joiden pohjalta Savolainen on laatinut edellä mainitun mallinnuksen.

Tutkimuksessa laskettiin hilaverkoston avulla kuviokohtaiset puustotiedot Evon opetusmetsän alueelle hyödyntäen laseraineistosta tuotettuja pituus-, latvus- ja maanpintamalleja. Näin saatuja puustotietoja verrattiin Eric Raunion maastomittauksiin, ja havaittuihin eroihin pyrittiin löytämään syitä maastokäyntien avulla.

Tutkimuksen keskeiset kysymykset:

- Ovatko laseraineiston perusteella lasketut puustotiedot yhtenevät maastomittausten tulosten kanssa?
- Mikäli merkittäviä eroja löytyy, mistä ne mahdollisesti johtuvat?

2 METSÄNMITTAUS JA ARVIOINTI SUOMESSA

Suomen metsävarojen systemaattinen arviointi juontaa juurensa 1920-luvulle. Tällöin käynnistyi ensimmäinen Valtakunnan metsien inventointi (VMI). Inventointi alkoi vuonna 1920, ja se saatiin päätökseen vuonna 1924. Tämän jälkeen Valtakunnan metsien inventointi on toistettu keskimäärin 5-10 vuoden välein. Tällä hetkellä on meneillään kaikkiaan yhdestoista Valtakunnan metsien inventointi. Inventointi alkoi vuonna 2009 ja maastotyöt valmistuivat vuoden 2013 aikana. (Metsäntutkimuslaitos n.d.)

Valtion metsien inventoinnin tarkoitus on tuottaa tietoa metsävaroista, maankäytöstä ja metsien omistussuhteista, metsien terveydentilasta, metsien omistussuhteista, monimuotoisuudesta sekä metsien hiilivaroista alueellisesti ja koko maan laajuisesti. Inventoinnin tulokset perustuvat monipuolisesti toteutettuihin maastomittauksiin. Ensimmäisissä mittauksissa käytössä oli linja-arviointi mutta myöhemmissä inventoinneissa on siirrytty käyttämään systemaattista koealamitainta. Maastokoealat ovat ryppäinä, ja rypäsverkko kattaa koko Suomen. (Metsäntutkimuslaitos n.d.)

2.1 Monilähteinen VMI

Valtion metsien inventoinnissa mitattua metsävaratietoa ei käytännössä voida yleistää pienille alueille, kuten yksittäisen kylän tai kunnan alueelle. Monilähdeinventoinnissa hyödynnetään maastomittausten lisäksi satelliittikuvia ja muita numeerisia tietolähteitä kuten numeerisia peruskarttoja ja korkeusmalleja. Näin koealoilta mitatut tiedot voidaan yleistää myös koealaverkon väliin jääville alueille. (Metsäntutkimuslaitos n.d.)

2.2 Metsänmittauksen hyödyt

Tietoa metsävaroista tarvitaan käytännössä kaikilla tasoilla yksittäisestä puusta aina suuriin yhtenäisiin metsikköalueisiin saakka. Keskeinen tavoite on selvittää ne tunnuksat, joilla on merkitystä metsänhoidollisiin päätöksiin tai esimerkiksi metsäluonnon kehityksen seurantaan. Tavalliselle metsänomistajalle tutuimpia metsävaratiedon hyödynnyskohteita lienevät metsäsuunnitelma, puukaupan kertymäärviot sekä metsän arvon määrittäminen esimerkiksi metsätilan myyntiä varten. (Ärölä 2008, 271.)

Operatiivisessa metsäsuunnittelussa hyödynnettävän kuvioittaisen arvioinnin tarkoituksena on tietyn metsäalueen hakkuumahdollisuuksien, hakkuukertymän ja toimenpidetarpeiden arviointi. Kuvioittaisen arvioinnin perusteella metsänomistajalle laaditaan suunnitelma jonka tarkoitus on tukea metsänomistajan päätöksentekoa. Operatiivista leimikkosuunnittelua taas tehdään puunhankinnan ohjausta varten, jotta puuta ostava taho saisi haluamiaan puutavaralajeja juuri oikeaan aikaan. Tällöin on tärkeää saada riittävän tarkkaa tietoa leimikon puutavaralajien jakautumisesta sekä puuston laadusta. (Holopainen ym. n.d., 5.)

Kaukokartoituksen avulla voidaan kerätä metsään liittyvää tietoa monella tasolla. Kartoitus voi koskea yksittäisiä puita, erikokoisia koealoja, metsätiloja tai suurempia yhtenäisiä metsäalueita. Kaukokartoitusta on käytetty

sekä kuvioittaiseen arviointiin että otantaan pohjautuvaan koeala-arviointiin. Uusimman teknologian avulla on mahdollista tehdä myös puukohtaisia mittauksia. Kaukokartoituksen avulla saatuja tietoja voidaan käyttää joko päätietolähteenä tai lisätietolähteenä erilaisissa metsän mittausta vaativissa prosesseissa. (Holopainen ym. n.d., 5–6.)

Metsien inventoinnin ja metsäsuunnittelun näkökulmasta uusien laserkeilausmenetelmien etuna on se, että perinteiset puustotunnukset voidaan tuottaa ainakin teoriassa entistä tehokkaammin estimointitarkkuuden silti kärsimättä. Lisäksi on mahdollista päästä eroon etukäteen laadituista kuviorajoista. Rasteri-ikkunoista ja pienkuvioista voidaan varsinaisen inventoinnin jälkeen muodostaa halutunlaisia toimenpidekuvioita. Laserkeilaus mahdollistaa myös yksittäisten puiden tulkinnan ja mittaamisen. (Holopainen ym. n.d., 8.)

Laserkeilaukseen perustuva metsien inventointimenetelmä on otettu nopeasti käyttöön heti ensimmäisten lupaavien tutkimustulosten valmistuttua. Ensimmäinen laserkeilauksen operatiivinen testi tehtiin Norjassa vuonna 2001. Vastaavia testejä tehtiin Ruotsissa ja Suomessa vuosina 2003 ja 2004. Jo vuonna 2008 metsäyhtiö UPM laserkeilasi Suomessa sijaitsevia metsiään 450 000 hehtaaria. Yksityismetsien laserkeilaus alkoi Suomessa vuonna 2010, jolloin keilattiin yli 2 miljoonaa hehtaaria metsää. (Holopainen ym. n.d., 9.)

2.3 Metsänmittauksen kehitys Evolla

Evolla on tietoisesti haluttu olla metsänmittauksen kehityksen eturivissä. Ensimmäiset satelliittipaikantimet hankittiin Evolle vuonna 1995. Aluksi GPS-signaalia sotkettiin tahallisesti ja niinpä Evollekin asennettiin oma GPS-tukiasema signaalin korjaamiseksi. Vuodesta 2001 lähtien opetussuunnitelmiin tuli valinnaiseksi erikoistumisopinnoiksi paikkatiedon hallinta. Reilun kymmenen vuoden sadat opiskelijat ovat syventäneet paikkatiedon osaamistaan näillä kursseilla. (Viitala 2012, 111.)

Evon opetusmetsä laserkeilattiin ensimmäisen kerran vuonna 2006. Tästä laserkeilauksesta alkoi ajanjakso, jonka aikana on tuotettu lukuisia tieteellisiä julkaisuja ja erilaisia materiaaleja paikkatiedon ja lasertekniikan opetusta varten. Vuodesta 2006 lähtien opetusmetsän alueella on mitattu yli 700 referenssikoealaa. Koealalla olevista puista on mitattu pituus-, läpimitta- ja puulajitiedot. Lisäksi on määritetty puiden sijainti sekä kerätty tietoa muun muassa latvojen leveydestä ja korkeudesta. Evolla on myös tutkittu lasertekniikan soveltuvuutta metsien biomassan määrittämiseen. (Viitala 2012, 111–113.)

Evon opetusmetsä on tähän mennessä laserkeilattu kolmeen kertaan. Lisäksi opetusmetsän alue on vuonna 2012 keilattu Maanmittauslaitoksen M2-keilauksen yhteydessä muodostettaessa maanpintamallia. Tätäkin aineistoa voidaan hyödyntää metsävaratiedon tuottamisessa. Tekniikkaa on kehitetty kerta kerralta. Viimeisimmässä keilauksessa tuotettiin laserpistepilven lisäksi myös aaltomuotolaser-aineistoa. Sen avulla pyritään ratkaisemaan puulajien tunnistamiseen liittyviä ongelmia ja parantaa puukoh-

taisten mallien laadinnan tuloksia. Evolaisten rooli on ollut tuottaa mittatietoa opetusmetsässä sijaitsevilta koealoilta. Aineiston avulla on esimerkiksi testattu laseraineistoja ja kehitetty analyysi- sekä tulkintamenetelmiä. Evolta kerättyä aineistoa on hyödynnetty muun muassa selvittäessä laserkeilausinventointien tarkkuuden merkitystä onnistuneelle metsäsuunnittelulaskennalle. (Viitala 2012, 113.)

3 LASERKEILAUKSEN PERUSTEET

Kaukokartoitus on tietojen keräämistä sähkömagneettisen säteilyn avulla, siis ilman fyysistä kosketusta tutkittaviin kohteisiin. Kaukokartoitusjärjestelmään kuuluvat toiminnot ovat tiedon hankinta, siirto, tallennus, esikäsittely, tulkinta ja tulosten esittäminen. Passiivisessa kaukokartoituksessa käytetään ilmaisimia, jotka keräävät tutkittavien kohteiden lähettämää tai heijastamaa säteilyä. Aktiivisissa kaukokartoitusjärjestelmissä on itsessään säteilylähde, joka valaisee kohteen. Tämä säteilylähde voi olla esimerkiksi tutka. Tavallisesti kaukokartoituksen apuna käytetään maastossa mitattua tai muuten hankittua referenssitietoa, jota tarvitaan tulkinnan avuksi, mitatalaitteen kalibroimiseksi sekä tulkintatulosten oikeellisuuden varmistamiseksi. (Kangas, Päivinen, Holopainen & Maltamo 2004, 121.)

Kaukokartoitus tarjoaa useita merkittäviä etuja verrattuna perinteiseen metsässä suoritettavaan inventointityöhön. Kaukokartoitus mahdollistaa tiedonhankinnan edullisesti laajoilta alueilta samanaikaisesti. Kaukokartoituksen avulla voidaan seurata tietyllä alueella tapahtuvia muutoksia. Kaukokartoitusaineiston perusteella laaditut analyysit ovat objektiivisia eli arvioijasta riippumattomia. Tämä on luonnollisesti merkittävä etu. Suurin hyöty kaukokartoituksesta saadaan kun toimitaan laajoilla alueilla ja mahdollisesti vaikeasti saavutettavissa kohteissa sekä erilaisissa seurantatehtävissä. Kaukokartoituksen käyttöä rajoittavat eniten epäsoyvät sääolosuhteet kuten pilvisyys sekä aineiston tarkkuuden vaihtelu ja geometrinen tarkkuus. (Kangas ym. 2004, 121.)

Kaukokartoituksen perusteella saatavaa tietoa voidaan hyödyntää pää- tai lisätietolähteenä muun muassa peruskartoituksessa, maa- ja metsätaloudessa, veden, jään ja lumen kartoituksessa, sään ennustamisessa ja vaikkapa geologiassa. Suomessa merkittävimmät sovellukset ovat käytössä metsätalouteen ja peruskartoitukseen liittyvissä prosesseissa. Metsätaloudessa kaukokartoitusta hyödynnetään pääasiassa metsien inventoinnissa, metsäsuunnitteluun liittyvässä kartoituksessa, puunhankinnan suunnittelussa, puun korjuussa ja kuljetuksessa, metsänhoidon suunnittelussa sekä erilaisten monimuotoisuuteen liittyvien kohteiden kartoituksessa. (Kangas ym. 2004, 121–122.)

3.1 Lasermittausten historiaa

Lasersäde kehitettiin vuonna 1958. Lasersädettä on 1960-luvulta lähtien hyödynnetty yleisesti niin sotilastiedustelussa kuin siviilitutkimuksessakin. Ensimmäinen artikkeli laserin käytöstä metsänmittauksessa julkaistiin vuonna 1977 neuvostoliittolaisten tutkijoiden toimesta. Euroopassa alan pioneerinä on toiminut ruotsalainen Mats Nilsson. Kaukokartoitussovelluksia on lähes poikkeuksetta hyödynnetty ensin sotilaskäytössä ja vasta tämän jälkeen ne ovat levinneet siviilitutkimuksen puolelle. Näin tapahtui myös laserkeilauksen osalta. Ensimmäiset sotilaskäytössä olleet laserkeilauslaitteet sijoittuvat 1990-luvun alkuun kun taas ensimmäinen kaupallinen keilain on tullut tarjolle vuonna 1994. Tuolloin lentolaserkeilauksen mahdollisuudet esimerkiksi maaston korkeusmallin tuottamiseen olivat vasta keskusteluasteella. (Holopainen ym. n.d., 10–11.)

3.2 Lentolaserkeilauksen tekniikka

Käsitteenä lentolaserkeilaus on kaukokartoitustekniikka, jota käytetään pinnanmuotojen, kasvillisuuden, kaupunkialueiden, jään sekä infrastruktuurin mallintamiseen. Usein käytetään myös nimitystä ilmalaserkeilaus. Laserkeilain tuottaa kohteesta kolmiulotteista informaatiota. Laserkeilaimien kehityksen mahdollistivat lentokoneinertiajärjestelmien, keilaustaajuuden, GPS-järjestelmien ja lasertekniikan kehitys. Laserkeilaimen perusidea on lopulta varsin yksinkertainen: kohteen ja laserin välinen etäisyys mitataan laserpulssin kulkuajan perusteella. Laserkeilain pyyhkäisee laserpulsseja lentosuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kun laserkeilaimen asento ja paikka ovat tarkasti tiedossa, voidaan mitattu etäisyys muuttaa korkeudeksi. Lasertutkan asento ja sijainti määritetään yleisesti inertiajärjestelmien ja GPS-mittausten avulla. Jokaista laserpulssia vastaava etäisyys voidaan muuntaa x-, y- ja z-koordinaateiksi. Prosessin tuloksena syntyy maaston/kohteen korkeuspistetiedosto. (Holopainen ym. n.d., 11–12.)

Pistepilvien prosessoinnissa käytetään luokittelua ja erilaisia pintamalleja. Tavallisimmin käytettyjä pintamalleja ovat maanpinnan maastomalli (DTM), korkeimpien kohteiden avulla määritetty pintamalli (DSM) sekä puuston korkeutta kuvaava puuston pituusmalli (CHM). Viimeistä kutsutaan myös normalisoiduksi pintamalliksi. Nämä ovat niin sanottuja perustuotteita, joita hyödynnetään useissa sovelluksissa, kuten metsätaloudessa. Lentolaserkeilauksen pistetiheys, paikannustarkkuus ja talletettujen kaikkujen lukumäärä ovat parantuneet huomattavasti viimeisen 15 vuoden aikana. Uutena ominaisuutena keilaimiin on tullut myös aaltomuodon tallentusmahdollisuus. (Holopainen ym. n.d., 12.)

3.3 Lentolaserkeilauksen edut

Lentolaserkeilaus on niin sanottu aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä. Kohteen mittauksessa hyödynnetään lasertykin lähettämää energiaa. Tällöin menetelmä ei ole riippuvainen auringon lähettämästä sähkömagneettisesta säteilystä. Passiiviset kaukokartoitusmenetelmät taas ovat riippuvaisia auringon sähkömagneettisesta säteilystä. Lentolaserkeilausta on mahdollista suorittaa mihin tahansa vuorokauden- tai vuodenaikaan. Optisen aallonpituusalueen kaukokartoituskuvien ongelmana olevat varjot eivät vaikuta lentolaserkeilauksen kuvatulkiintaan millään tavalla. Metsätalouden kannalta lentolaserkeilaus on erittäin varteen otettava menetelmä, sillä se soveltuu maastomallin ja kohteiden mittaamiseen erityisesti puustoisilla alueilla. Suurin osa pulsseista toki heijastuu suoraan puustosta, mutta osa tunkeutuu maahan asti latvustossa olevien aukkojen kautta. Lentolaserkeilaus onkin kehitetty juuri peitteisten alueiden maastomallinnusta varten. Menetelmän suurin etu perinteiseen fotogrammetriseen mittaukseen verrattuna on pistetiheys. Perinteinen fotogrammetria edellyttää, että sama piste näkyy kahdelta ilmakuvasta. Tämän vuoksi peitteisiltä alueilta hajapisteitä saadaan tavallisesti kymmenien metrien välein. Lentolaserkeilauksella saadaan useita näytteitä jokaista neliömetriä kohden, jolloin tiheissäkin metsissä kahden pisteen välinen etäisyys on Suomen olosuhteissa yleensä vähemmän kuin kymmenen metriä. Suomalaisissa havumetsissä

lasersäteen läpäisyprosentti on tavallisesti noin 20-50 %, vaihtelu tapahtuu lähinnä runkotilavuuden funktiona. Toisaalta lentolaserkeilauksen huono puoli fotogrammetriseen mittaukseen verrattuna on heikompi alueellinen erotuskyky ja spektrisen informaation puute. Uusimmat lentolaserkeilauslaitteistot kykenevät kuitenkin tallentamaan mitattavasta kohteesta intensiteetin ja mahdollisesti myös aaltomuodon, jolloin kohteen luokittelua on mahdollista tarkentaa. (Holopainen ym. n.d., 14–15.)

3.4 Lentolaserkeilauksen kustannukset

Viimeisen kymmenen vuoden aikana lentolaserkeilauksen avulla tehdyn tiedon keräämisen kustannukset ovat pudonneet tasaisesti. Suurin syy ilmiöön on kasvanut kilpailu alan eri palveluntarjoajien välillä. Koko maan kattavissa keilauksissa hintataso on 15-30 €/km². Lentolaserkeilauksen hintaan vaikuttaa eniten keilattavan alueen koko. Siirtokustannukset lentolaserkeilauksessa ovat tyypillisesti kolmesta kuuteen tuhanteen euroa. Suomen lisäksi koko maan tai osavaltion kattavia keilauksia on tehty ainakin Ruotsissa, Hollannissa, Saksassa, Itävallassa, Sveitsissä ja USA:ssa. (Holopainen ym. n.d., 15.)

4 LENTOLASERKEILAUUS METSIEN INVENTOINNISSA

Lentolaserkeilaus suoritetaan tavallisesti joko lentokoneesta tai helikopterista. Lentolaserkeilauksessa mitattavasta kohdealueesta muodostetaan kolmiulotteinen pisteaineisto, jossa jokaisella pisteellä on x- ja y-koordinaatti sekä kohteen korkeutta merenpinnasta kuvaava z-koordinaatti. Metsien laserkeilauksessa lentokorkeus on tavallisesti 400-4000 metriä. Tällöin laserkeilan halkaisija maanpinnalla on noin 0,1-2 metriä. Lentolinjan leveys maastossa on 100-1000 metriä. (Holopainen ym. n.d., 27.)

4.1 Lasersäteen ja puuston vuorovaikutus

Laserpulssin osuma puustoon tuottaa yhden tai useamman paluukaiun. Yksittäisen paluukaiun tapauksessa laserpulssi osuu esimerkiksi tiheään lehvästön pintaan ja aiheuttaa tällöin yhden paluukaiun. Käytännössä metsikön latvus ei kuitenkaan ole yhtenäistä pintaa ja puustossa on erisuuruisia aukkoja. Laserpulssi osuu lehvästöön, läpäisee latvuksen ylimmän osan ja leikkaa puuston eri osia, kuten puun oksia ja lehtiä osuen lopulta maahan. Tämä aiheuttaa useita paluukaikuja, vaikkakin useimmiten syntyy vain yksi paluukaiku. Voidaan perustellusti olettaa, että ensimmäiset kaiut tulevat suurimmalta osin latvuston huipulta ja viimeiset enimmäkseen maan pinnasta. Näin ollen paluupulssien avulla on mahdollista arvioida maanpinnan taso. Usean paluukaiun avulla saadaan siis hyödyllistä tietoa metsän rakenteesta. (Holopainen ym. n.d., 27.)

Puiden rungot, oksat ja lehdet aiheuttavat laserkeilaimella lähetetyille pulssille moninkertaisia heijastuksia ja tämän lisäksi signaalin heikkenemistä. Mitä tiheämpi keilattava metsä on, sitä vähemmän syntyy paluukaikuja ja sitä heikompi on paluukaikujen voimakkuus maan pinnalta. Laserpulssi ei tavallisimmin heijastu puun korkeimmasta kohdasta, vaan se tunkeutuu joitakin kymmeniä senttejä kunnes paluupulssin voimakkuus on riittävä tullakseen ilmaistuksi. Paluupulssien määrä pienenee keilauskulman kasvaessa. (Holopainen ym. n.d., 28.)

4.2 Yksinpuintulkinta ja aluepohjainen menetelmä

Tällä hetkellä metsien lentolaserkeilauksessa on olemassa kaksi pääteknikkaa puustotietojen tuottamiseksi. Nämä tekniikat ovat yksinpuintulkinta (Individual tree detection ITD) ja aluepohjainen menetelmä (Area-based approach ABA). Puustotiedot tuotetaan mittaamalla puiden fysikaalisia ominaisuuksia suoraan 3D-pistepilvistä tai vaihtoehtoisesti hyödyntämällä ennustettavien tunnusten ja pistepilvistä laskettujen piirteiden tilastollisia riippuvuussuhteita. Aluepohjaiseen tulkintaan soveltuu harvapulssinen laserkeilausaineisto. Tällöin pulssitiheys on 0,5-2 pulssia neliömetriä kohden. Yksinpuintulkinnassa on käytettävä tiheämpi pulssista aineistoa, sopiva pulssitiheys on yli kaksi pulssia neliömetriä kohden. Metsäsuunnittelussa ollaan vähitellen siirtymässä puustoinventoinnin osalta aluepohjaiseen inventointimenetelmään. Tällöin pulssitiheys on harvahko ja inventointi perustuu piirteiden irrotukseen ja ei-parametriseen estimointiin. Me-

netelmä perustuu siihen, että jokainen otosyksikkö liitetään piirteiltään samankaltaisimpaan maastossa mitattuun otosyksikköön eli koealaan. Tällöin kaikille tulkittaville otosyksiköille kyetään liittämään myös maastomittaustieto. Menetelmän luotettavuuden kannalta on olennaista että jokaisesta tulkittavan metsäalueen ositteesta on riittävä määrä koealoja. Tämän seurauksena aluepohjainen menetelmä vaatii tarpeeksi laajan ja tarkasti mitatun maastoaineiston. Toistaiseksi estimoinnin apuna käytetään numeerisia vääräväri-ilmakuvia, joilla voidaan tehostaa puulajiositteiden tulkin-tatarkkuutta. (Holopainen ym. n.d., 29–30.)

4.3 Pintamallit

Laserkeilausaineisto luokitellaan 3D-pisteaineistoksi. Piirteiden lasken-nassa pisteistä tarvitaan seuraavia ominaisuuksia: sijainti, kaiun tyyppi se-kä pisteen korkeus maanpinnasta. Näiden lisäksi voidaan hyödyntää kaiun intensiteettiä tai mahdollisesti koko aaltomuotoa. Laserkeilaamalla kerä-tystä pisteaineistosta irrotetaan tavallisimmin piirteitä joko yksittäisen puun latvuksen tai vaihtoehtoisesti aluepohjaisen menetelmän estimoin-tiyksikön tasolta. Tällöin piirteiden irrotusyksikkö on latvussegmentti, ras-terisolu tai mikrokuvio. Molemmissa menetelmissä piirteiden irrotus pe-rustuu pistemäisestä korkeustiedosta muodostettuun jatkuvaan maanpin-tamalliin (DTM, Digital Terrain Model). Maanpintamallin avulla abso-luuttiset korkeudet voidaan muuntaa kuvaamaan korkeutta maanpinnasta. Yksinpuintulkinnassa hyödynnetään lisäksi puiden pituutta kuvaavaa pin-tamallia eli puuston korkeusmallia (CHM, Canopy Height Model). Puus-ton korkeusmalli saadaan laskettua kohteiden absoluuttista korkeutta ku-vaavan mallin (DSM, Digital Surface Model) ja maanpintamallin erotuk-sena. (Holopainen ym. n.d., 31.)

4.4 Pintamallien luonti

Yleisesti käytetty menetelmä pintamallin muodostuksessa on ottaa korkein kaiku annetusta ympäristöstä ja tämän jälkeen interpoloida puuttuvat kor-keudet. Latvuston korkeusmalli saadaan vähentämällä maanpinnankorkeus luodusta pintamallista. Latvuston korkeusmallia voidaan kutsua myös normalisoiduksi pintamalliksi. Absoluuttista korkeutta kuvaava malli (DSM) lasketaan korkeimmista ensimmäisistä kaiuista ja vastaavasti maanpintamalli (DTM) lasketaan matalimmista kaiuista. Vastaavasti la-serkaikujen korkeus saadaan normalisoitua vähentämällä niistä maanpin-nan korkeus (DTM). (Holopainen ym. n.d., 31.)

4.5 Pintamallien laatu

Maanpintamallin tarkkuus vaihtelee metsäolosuhteissa noin kymmenestä viiteenkymmeneen senttimetriä. Tämän voidaan katsoa olevan riittävä tarkkuus puustotulkinnalle. Tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat metsi-kön rakenne ja käsittely sekä keilausparametrit, avauskulmat ja pulssitihe-yys. Ahokas ym. (2002) vertailivat kolmea erilaista maastomallin laadinta-menetelmää metsässä. Tuloksissa satunnaisvirheeksi saatiin 13–41 cm. Vastaavasti Reutebuch ym. (2003) saivat omissa tutkimuksissaan satun-

naisvirheeksi 14 cm avohakkuilla, 14 cm voimakkaasti harvennetuissa metsissä, 18 cm lievästi harvennetuissa metsissä ja 29 cm luonnontilassa olevissa metsissä. Takeda (2004) pääsi tutkimuksessaan 10-20 cm:n tarkkuuteen tiheissäkin metsissä. Eri tutkimusten tulokset ovat siis suhteellisen lähellä toisiaan. (Holopainen ym. n.d., 32–33.)

Puuston korkeusmallia laadittaessa puusta saadut suorat havainnot ovat usein aliarvioita. Ensimmäinen paluukaiku ei kovinkaan usein heijastu puun latvuksen korkeimmasta osasta. Laserkeila kyllä osuu puun korkeimpaan kohtaan, mutta ohut latva ei ole riittävän tiheä jotta se saisi aikaan tunnistettavan paluukaiun. Niinpä puuston ylimmän osan havaitseminen ja tunnistaminen vaatii riittävän laserpulssitiheyden tai keilan koon sekä riittävän herkkyuden omaavan vastaanottimen. Edellä mainitun ongelman lisäksi tiheästä aluskasvillisuudesta johtuva yliarvio maanpintamallista lisää entisestään puuston korkeusmallin aliarviota. Lisäksi puuston korkeusmallin luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat lentokorkeus, pulssitiheys, keilan koko, käytetyt mallinnusalgoritmit, laserkeilaimen ominaisuudet sekä puun latvuksen muoto ja tiheys. (Holopainen ym. n.d., 34–35.)

4.6 Piirteiden irrotusyksikkö

Laskettaessa metsikkötunnuksia laserpiirteet irrotetaan tyypillisesti säännöllisestä hilaruudukosta. Hilaruudun koko maastossa on tavallisesti 100-900 neliometriä. Hilaruudukon koko riippuu käyttötarkoituksesta sekä maastokoealojen koosta. Pienellä hilaruudukolla tehty tulkinta on lähes verrattavissa yksinpuintulkintaan. Suuri hilaruutu voi jo pitää sisällään lähes kokonaisen metsikkökuvion. Suomessa käytössä olevassa laserinventointijärjestelmässä piirteiden irrotusyksikkö on 16 m x 16 m hilaruutu. (Holopainen ym. n.d., 35.)

Vaihtoehto hilaruudukolle on mikrokuvioden käyttö piirteiden irrotuksessa. Mikrokuviot tuotetaan segmenttoimalla kaukokartoitusaineistoa joko automaattisesti tai puoliautomaattisesti. Tavallisesti mikrokuvioinnissa käytetään laseraineistoa, ilmakuvia, satelliittikuvia tai näiden yhdistelmiä. Mikrokuvio on spatiaalisesti jatkuva, puustotunnuksiltaan mahdollisimman homogeeninen alue, joka noudattaa metsikön luonnollisia rajoja. Juuri luonnolliset rajat ovat mikrokuvion etu hilaruutuun verrattuna. (Holopainen ym. n.d., 36.)

4.7 Piirteiden valinta

Laseraineistosta irrotettujen piirteiden määrä kohoaa helposti niin suureksi että haluttujen tunnusten ennustamiseksi piirteitä on pakko vähentää. Parhaiten puu- ja puustotunnusten kanssa korreloivien piirteiden valitsemiseksi on olemassa useita eri menetelmiä. Pääosin menetelmät ovat samoja, mitä käytetään muidenkin kaukokartoitusaineistojen kanssa piirteitä valittaessa. Tavallisin menetelmä valita automaattisesti piirteitä regressiomalleihin on askeltava regressio. Piirteiden valintamenetelmiä löytyy runsaasti erilaisia. Useissa tutkimuksissa valintamenetelmien välillä ei kuitenkaan

ole todettu olevan juurikaan eroa. Lisäksi tulokset ovat olleet varsin risti-riitaisia. (Holopainen ym. n.d., 39.)

4.8 Intensiteetti

Paluukaiun voimakkuudesta käytetään nimitystä intensiteetti. Tavallisimmin intensiteettiä hyödynnetään puulajitulkinnassa. Paluukaiun intensiteetti on riippuvainen kohteen heijastusominaisuuksista sekä kohteen geometriasta. Lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat laserpulssin lähetysvoimakkuus, lähetystaajuus ja kaiun vastaanottimen asetukset sekä ilmakedä. Intensiteetin kalibroinnissa on havaittu ongelmia, ja tämän on havaittu aiheuttavan ongelmia intensiteettiä käytettäessä selittävinä muuttujina. Paluukaikujen intensiteeteistä voidaan laskea kaikutyyppittäin korkeuden prosenttipisteitä sekä erilaisia intensiteettijakauman momentteja, kuten keskiarvo, varianssi ja vinous. Paluukaiusta voidaan tallentaa myös koko kaiun aaltomuoto. Aaltomuodosta voidaan päätellä mistä diskreettiaineiston paluukaiut ovat tulleet ja lisäksi se kertoo paluukaiun intensiteetistä. Aaltomuotoaineistosta mahdollisesti irrotettavia piirteitä ovat kaiun amplitudi, pituus, pinta-ala ja vinous. (Holopainen ym. n.d., 38–39.)

4.9 Keskimääräisten tilavuustunnusten virhe ja harha (RMSE ja BIAS)

Laserkeilauksen ja maastomittausten keskinäistä suhdetta vertailtiin laskemalla menetelmien tunnusten välinen absoluuttinen virhe ja harhaisuus. RMSE, (keskineliövirheen neliöjuuri, root-mean-square error) ja bias, (harha). Laskemalla menetelmien välinen harha saadaan selville jos estimoitujen tunnusten joukko on tarkka ja harhaton eli tiiviissä nipussa lähellä origoa tai epätarkka ja harhainen, jolloin pisteet ovat hajallaan. Tulos voi myös olla tarkka mutta harhainen jos pistejoukko on tiiviisti yhdessä mutta etäällä origosta. RMSE % osoittaa menetelmien välisen suhteellisen virheen. Kuvissa 1 esitetyssä kaavassa mitattu arvo tarkoittaa maastomittauksilla tuotettuja lukuja ja ennustettu arvo laseranalyysillä tuotettuja lukuja. Koepuiden lukumäärä tarkoittaa koealojen tai kuvioiden lukumäärää riippuen siitä kumpia tutkitaan. (Joensuu 2013, 23–24).

$$RMSE \text{ (absoluuttinen)} = \sqrt{\frac{\sum (\text{mitattu arvo} - \text{ennustettu arvo})^2}{\text{koepuiden lukumäärä}}}$$

$$Harha \text{ (absoluuttinen)} = \frac{\sum (\text{mitattu arvo} - \text{ennustettu arvo})}{\text{koepuiden lukumäärä}}$$

Kuva 1. Menetelmien absoluuttisen virheen ja harhan laskentakaavat (Joensuu2013).

$$RMSE\ (suhteellinen) = \frac{RMSE\ (absoluuttinen)}{maastoreferenssin\ keskiarvo} \times 100\ \%$$

Kuva 2. Menetelmien välisen suhteellisen virheen laskentakaava (Joensuu 2013).

5 LASERKEILAUKSEEN PERUSTUVAN METSÄVAROJEN INVENTOINNIN TULEVAISUUS

Suomi tullaan mitä todennäköisimmin laserkeilaamaan kokonaisuudessaan tulevan vuosikymmenen aikana. Esimerkiksi vuonna 2011 keilattiin metsätalouden sovelluksia varten n. 3 miljoonaa hehtaaria. Tulevaisuudessa menetelmien kehittyessä lentolaserkeilaus on mahdollista toteuttaa entistä korkeammalta, mikä pienentää keilauksesta aiheutuvia kustannuksia. Olettavasti keilausaineisto nouseekin yhtä merkittäväksi metsäsuunnittelun tietolähteeksi kuin mitä ilmakuvat ovat jo pitkään olleet. Lentolaserkeilaus onkin jo nykyisin osa operatiivista metsäsuunnittelua. (Holopainen ym. n.d., 85.)

Useat suomalaiset metsäorganisaatiot ovat kehittäneet ja kehittävät parhaillaan metsäsuunnittelun tietojärjestelmiä, joiden perimmäinen ajatus on metsävaratiedon pitäminen mahdollisimman ajantasaisena. Laserkeilausaineistolla tulee jatkossa olevaan merkittävä rooli metsävaratietojen päivityksessä ja ajan tasalla pitämisessä. Metsä- ja leimikkosuunnittelussa tietojen tarkkuudella on suuri merkitys, jotta suunnittelu olisi tehokasta ja tulokset mahdollisimman tarkoituksenmukaisia. Riittävän tarkalla laserkeilaustekniikalla olisi periaatteessa mahdollista palata pystymittauksen aika-kauteen ilman työvoiman lisäystarvetta. Tällä hetkellä suurimmat keilaustekniikan kehityshaasteet liittyvät yksittäisten puiden tunnistamiseen, puulajitulkintaan sekä runkojen laadun mittaukseen. Mikäli nämä haasteet onnistutaan ratkaisemaan, kyetään puunkorjuun logistiikkaa ja runkojen ap-teerausta tulevaisuudessa huomattavasti tehostamaan. Lisäksi puustotulkinnan ja maastomallien yhteistulkinnalla kyetään tulevaisuudessa mahdollisesti määrittämään erilaisia metsänhoidon tarpeita esimerkiksi kunnostusajituksiin liittyen. (Holopainen ym. n.d., 85–86.)

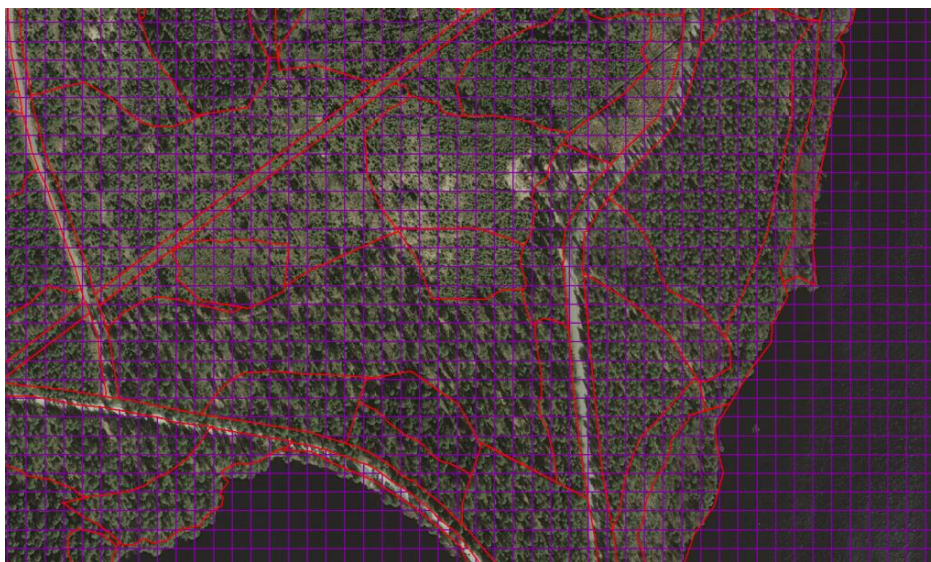
Laserkeilaus on tiedonlähteenä kallis verrattuna esimerkiksi satelliittikuviin. Lisäksi keilausaineisto yksinään ei toistaiseksi riitä inventointitiedon muodostukseen vaan lisäksi tarvitaan myös muuta kaukokartoitusaineistoa. Kuitenkin menetelmien kehittyessä myös kustannukset tulevat alenemaan. Lisäksi riittävän monipuolinen ja tarkka aineisto mahdollistaa maastotöiden tarpeen vähenemisen ja sen myötä työvoimakustannuksia on mahdollista alentaa huomattavasti. Tämä koskee koko metsätalouden toimialaa metsänhoidosta puun korjuuseen ja leimikkosuunnitteluun unohtamatta laserkeilauksen tarjoamia mahdollisuuksia ympäristön ja metsien monimuotoisuuden suunnittelussa. (Holopainen ym. n.d., 85–86.)

6 TUTKIMUSVAIHEET

Vertailun pohjana käytettiin Terratec Oy:n Pekka Savolaisen mallintama hilaruudukkoa Evon opetusmetsän metsäkuvioiden päällä. Maastossa sivultaan 16 metriä pitkän hilaruudun pinta-ala on 256 neliömetriä. Jokaisen ruudun ominaisuustietotaulu sisältää laserkeilausaineistosta estimoidut puustotiedot. Ennen hilatietokannan jatkolaskentaa oli karsittava maastonkohdat joiden tiedetään tuottavan virhearvoja. Karsinta kohdentui seuraaviin maastopääryhmiin: vesistöt, tiet, tonttimaat, voimansiirtolinjat, jättömaat, varastoalueet ja metsälain 10§ arvokkaat elinympäristöt ja niiden suojavyöhykkeet.

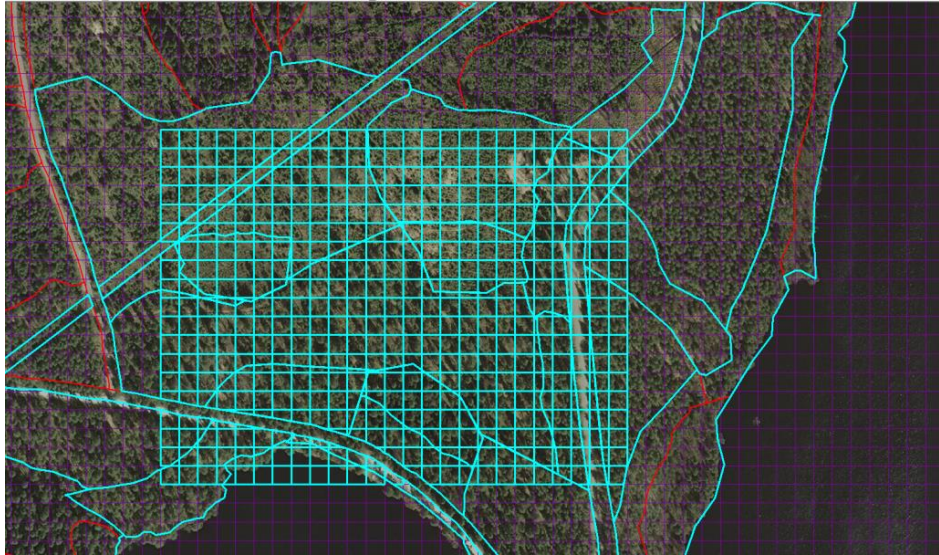
6.1 Kuviokohtaisen puustotulkinnan vertailu

Maastossa opetusmetsän alueen kuvioiden puustomittaukset ja kuvioinnin on suorittanut metsäsuunnittelija Eric Raunio. Kuviotietoja on vuosittain päivitetty eli kasvatettu SUTIGIS-puustonlaskentaohjelmalla.



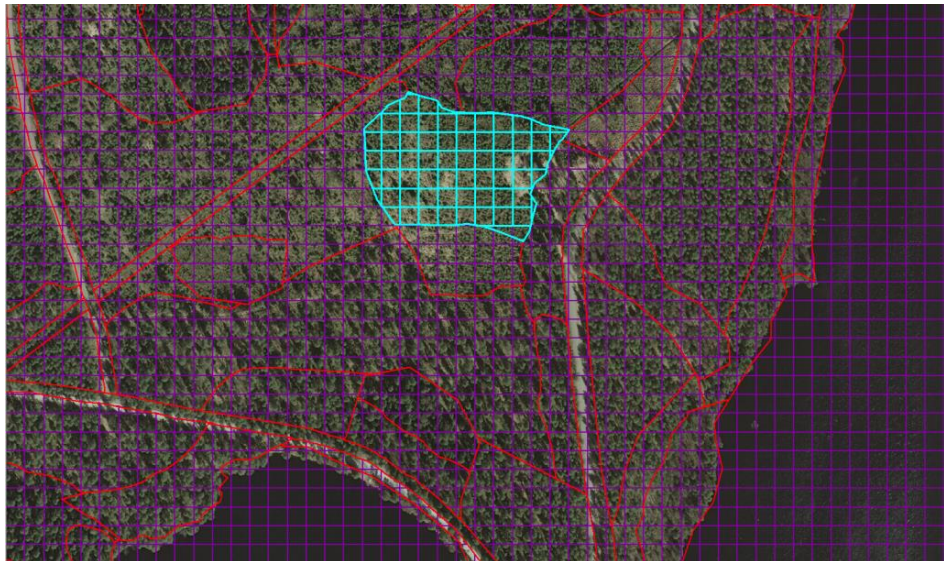
Kuva 1. Hilaruudukko Evon opetusmetsän metsäkuvioiden ja ilmakuvan päällä.

Koko opetusmetsän alueen kattava hilaruudukko leikattiin kuviorajoilla. Osa ruuduista jakaantui kahteen tai useampaan osaan. Hilaston geometriatiedolle suoritettiin uudelleenlaskenta ominaisuustietotaulussa, jolloin jakautuneille ruuduille saatiin päivitetty pinta-ala. Jakaantuneen ruudun alkuperäiset ominaisuustiedot siirtyvät tällöin täysimääräisinä edellä jakautuneisiin osiin. Hilaruudukon ominaisuustiedoista lasketut kokonaistilavuudet uudelleen laskettiin jakautuneiden osaruutujen nykyistä pinta-alaa vastaaviksi.



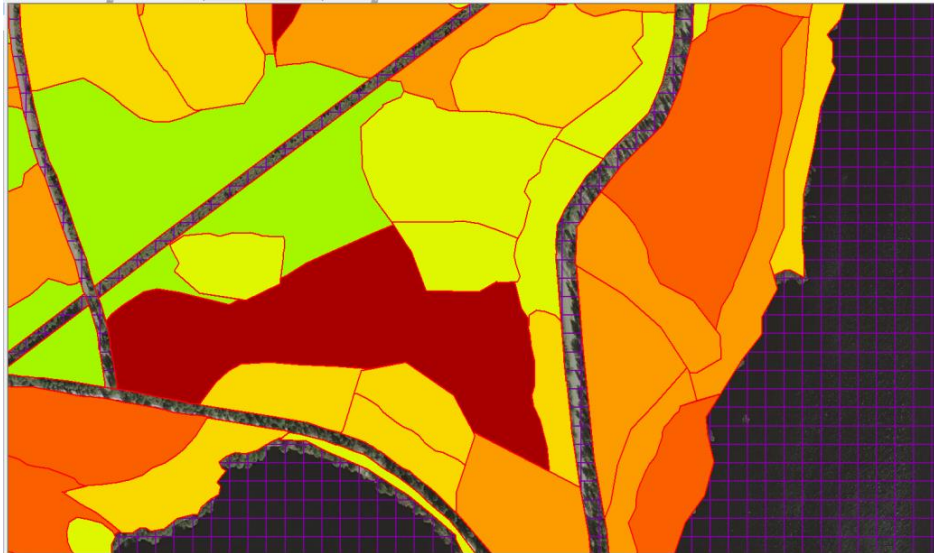
Kuva 2. Kuvioiden ulkorajoilla leikattu hilaruudukko. Kuvan keskelle valintatyökälulla havainnollistettu käsiteltävät objektit.

Kaikkien tutkimuksessa merkitsevien kuvioiden yksittäisten peittoalueiden kokonaisten ja osahilaruutujen estimoidut tilavuudet laskettiin yhteen. Näin saatiin laseraineistosta mallinnettujen puustotietojen kuviotason tilavuudet.



Kuva 3. Yksittäisen metsäkuvion peittoalueelle sijoittuvat kokonaiset ja osaruudut korostettuna.

Mallintamalla ja maastomittauksin tuotetut kuviokohtaiset tilavuuden erotukset visualisoitiin kartalle liukuvärein. Tilavuuksia verrattiin kuvion kokonaispinta-alaisesti sekä hehtaariohtaisesti.

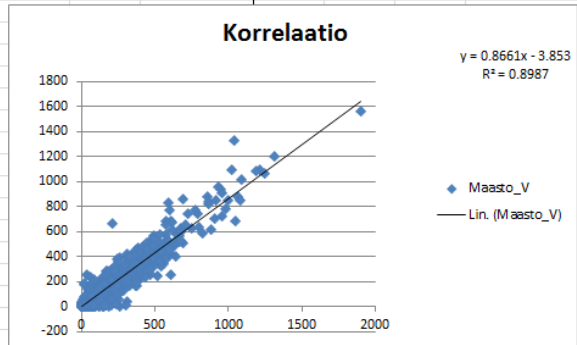


Kuva 4. Kuviotason maastomitatun ja laseraineistosta mallinnetun tilavuuden välinen erotus on havainnollistettu liukuvärein. Tummat värit kuvaavat suurta tilavuuden eroa ja vaaleat tilavuuksien yhdenmukaisuutta.

Numeerista vertailua varten, kuvioiden ominaisuustietotauluun lasketut arvot näkyvät alla Excel-tietotauluun lisättynä. Vertailuja tehtiin kaikkien kuvioiden kesken sekä tiettyjä rajauksia käyttäen. Kaikkiaan tarkasteltiin 1778 kuvioita. Laserkeilauksen tarkkuutta laskettaessa halusimme ilmentää virhearvoja tuottavia kuvioiden ominaisuuksia, joista tärkeimpänä kuvion puuston kokonaistilavuus. Hypoteesina oli taimikoiden ja nuoren kasvatusmetsän tulosten epätarkkuus. Joten laskennoissa käytettiin myös kuviojoukkoja, joista rajattiin tarkastelun ulkopuolelle kuviot, joiden puuston hehtaaritilavuus jäi alle 20 m³ ja toisessa joukossa alle 50 m³. Tulokset olivat kauttaaltaan loogisia ja vahvistivat hypoteesin, mutta ennakoitua lievempänä.

Maastossa mitattu, kaikkien kuvioiden tilavuuksien keskiarvo on 122.5 m³/ha. Vastaava laseraineiston antama keskiarvo asettui 145.9 m³/ha. Taimikko- tai nuoret kasvatusmetsäkuviot rajattuna mittaustapojen välinen ero säilyi lähes samansuuruuisena, vaikka tilavuuden keskiarvot nousivat. Laser- ja maastomittausaineisto korreloivat hyvin vahvasti. Selitysaste on parhaimmillaan 90,3 %. Lukumääräisesti suurimmalla kuviojoukolla korrelointi on vahvinta. Samoin analyysin harhaisuus on pienintä kaikista laajimmalla otannalla. Pienimmillään erittäin hyvä 0,013 yksikön osaa. RMSE % on sitä parempi mitä enemmän taimikoita ja nuorta kasvatusmetsää jätetään arvioinnin ulkopuolelle. Parhaimmillaan suhteellinen keskineliövirheen neliö on 39,4 %, kun mukana on vain kuviot joissa on enemmän kuin 50 m³/ha.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1					Laser				Maasto			
2	Kuvio	Laser_V	Maasto_V		V_stand	Keskiarvo	Keskihajo	Variaatiokerroin	V_stand	Keskiarvo	Keskihajo	Variaatiokerroin
3	21	61.0142	45.8112		-0.48838	145.88	173.77	1.19118672	-0.48304	122.499	158.76	1.296017115
4	22	66.4638	71.3972		-0.45702				-0.32188			
5	29	198.068	215.137		0.30033				0.58351			
6	32	135.86	112.437		-0.05766				-0.06338		Korrelaatiokerroin	
7	35	122.769	83.5012		-0.13299				-0.24564		0.94802	
8	36	46.2584	67.4772		-0.57329				-0.34657			
9	37	16.0452	25.859		-0.74716				-0.60871			
10	38	86.1213	118.611		-0.34389				-0.02449			
11	39	29.1436	42.1008		-0.67178				-0.50641			
12	40	10.2015	1.2678		-0.78079							
13	41	0.69794	0		-0.83548							
14	43	22.223	20.0981		-0.71161							
15	44	610.971	686.987		2.67648							
16	45	63.5931	0		-0.47354							
17	46	386.904	314.35		1.38703							
18	54	126.969	144.692		-0.10882							
19	60	201.889	109.439		0.32232							
20	67	646.732	586.874		2.88228							
21	81	1901.82	1561.62		10.105							
22	82	53.4837	17.9376		-0.53171							
23	85	1208.01	1091.81		6.11229							
24	102	60.5947	34.6666		-0.49079							
25	126	179.845	235.32		0.19546							
26	128	55.3858	41.7226		-0.52077							
27	131	51.5795	27.5975		-0.54267							
28	132	192.252	152.623		0.26686				0.18975			



Taulukko 1. Kuviokohtaisen vertailun Exel –taulu, (kaikki kuviot).

	RMSE							BIAS			
Kuvio	Erotus	Erotus^2	Summa	Keskiarvo	RMSE	RMSE%		Erotus	Summa	Keskiarvo	Harha
21	15.203	231.132	6471614	3639.83	60.331	49.2503		15.203	41571.2	23.3809	0.01315
22	-4.93336	24.3381						-4.93336			
29	-17.0689	291.346						-17.0689			
32	23.4229	548.634						23.4229			
35	39.2681	1541.98						39.2681			
36	-21.2188	450.239						-21.2188			
37	-9.81377	96.3101						-9.81377			
38	-32.4897	1055.58						-32.4897			
39	-12.9572	167.888						-12.9572			
40	8.93368	79.8106						8.93368			
41	0.69794	0.48712						0.69794			
43	2.12489	4.51516						2.12489			
44	-76.0162	5778.47						-76.0162			
45	63.5931	4044.09						63.5931			
46	72.5537	5264.04						72.5537			
54	-17.7228	314.099						-17.7228			
60	92.4501	8547.03						92.4501			
67	59.8583	3583.02						59.8583			
81	340.201	115737						340.201			
82	35.5461	1263.52						35.5461			
85	116.201	13502.8						116.201			
102	25.9281	672.268						25.9281			
126	-55.4751	3077.48						-55.4751			
128	13.6632	186.682						13.6632			
131	23.982	575.134						23.982			
132	39.6295	1570.5						39.6295			

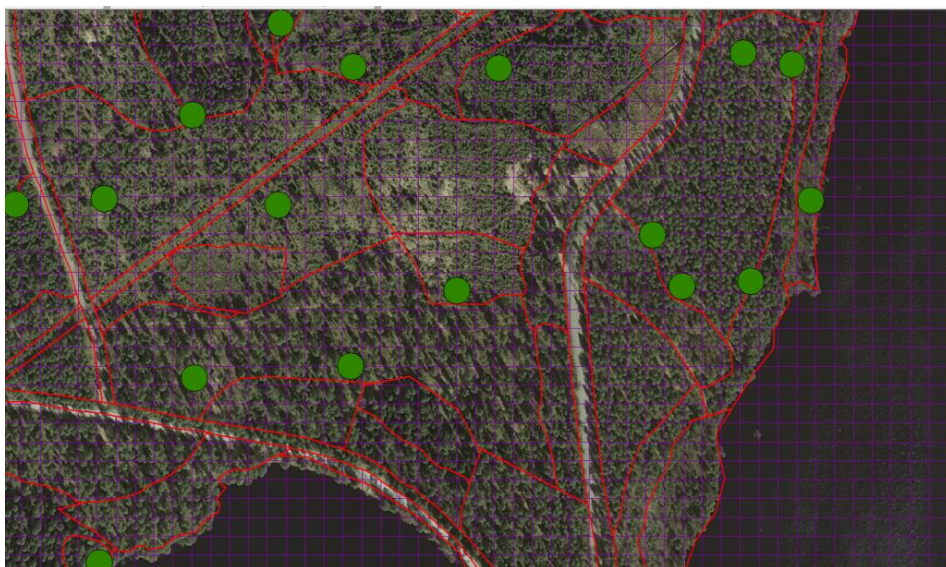
Taulukko 2. Kuviokohtaisen vertailun RMSE ja BIAS arvot, kaikki kuviot).

Kuviokohtainen vertailu Evon opetusmetsän alueella			Kuviokohtainen vertailu Evon opetusmetsän alueella		
Kaikki kuviot			Kuviot yli 20m3/ha		
	Laseraineisto	Maastomitattu		Laseraineisto	Maastomitattu
Puuston kokonais-tilavuuden keskiarvo	145,9	122,5	Puuston kokonais-tilavuuden keskiarvo	166,7	145
Keskihajonta	173,8	158,8	Keskihajonta	181,7	164,4
Variaatiokerroin	1,19	1,3	Variaatiokerroin	1,09	1,13
RMSE	60,3		RMSE	61,6	
RMSE%	49,3		RMSE%	42,5	
BIAS	0,013		BIAS	0,015	
Selitysaste	89,9		Selitysaste	90,1	
Kuviokohtainen vertailu Evon opetusmetsän alueella					
Kuviot yli 50m3/ha					
	Laseraineisto	Maastomitattu			
Puuston kokonais-tilavuuden keskiarvo	181,8	160			
Keskihajonta	187,4	168,9			
Variaatiokerroin	1,03	1,06			
RMSE	63				
RMSE%	39,4				
BIAS	0,016				
Selitysaste	90,3				

Taulukko 3. Kuviokohtaisen vertailun tulokset. Kaikki kuviot, kuviot yli 20 m³/ha ja kuviot yli 50 m³/ha.

6.1 Koealakohtaisen puustotulkinnan vertailu

Evon opetusmetsän vastin- eli referenssikoealat hilaruudukon ja metsäkuvioiden päällä. Evon maastossa mitatut vertailukoealat on havainnoitu kuvassa vihrein symbolein. Yli 800 kappaletta koealoja ovat suurelta osin opiskelijoiden mittaamia, niiden säde on 9,77 metriä ja siten jokaisen pinta-ala 300 neliömetriä. Jokaiselta koealalta on mitattu kattavat puusto- ja paikkatiedot, sekä näistä estimaateista jatkojalostettu koealakohtaiset tilavuudet muodossa kiintokuutiota puuta koealalla.



Kuva 5. Referenssikoealoja Evon opetusmetsän alueella. Alemmilla tasoilla näkyy hilaruudukko, metsäkuviot ja ilmakehä.

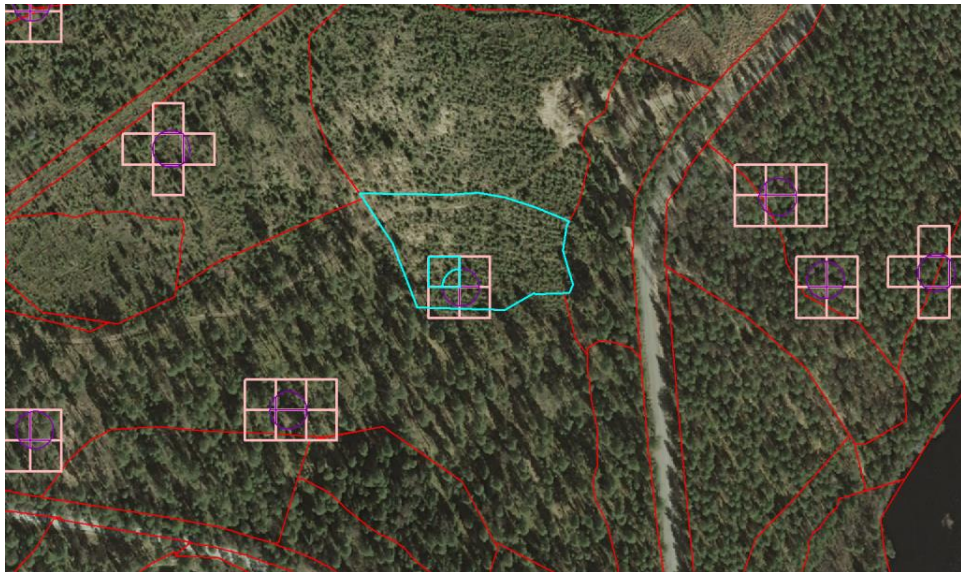
Referenssikoealojen peittoalueelle sijoittuvat hilaruudut valittuina omaksi tasokseen. Taustalla näkyvät kuviotaso ja alueen ilmakuva.



Kuva 6. Referenssikoealat ja niiden peittoalueelle sijoittuvat hilaruudut.

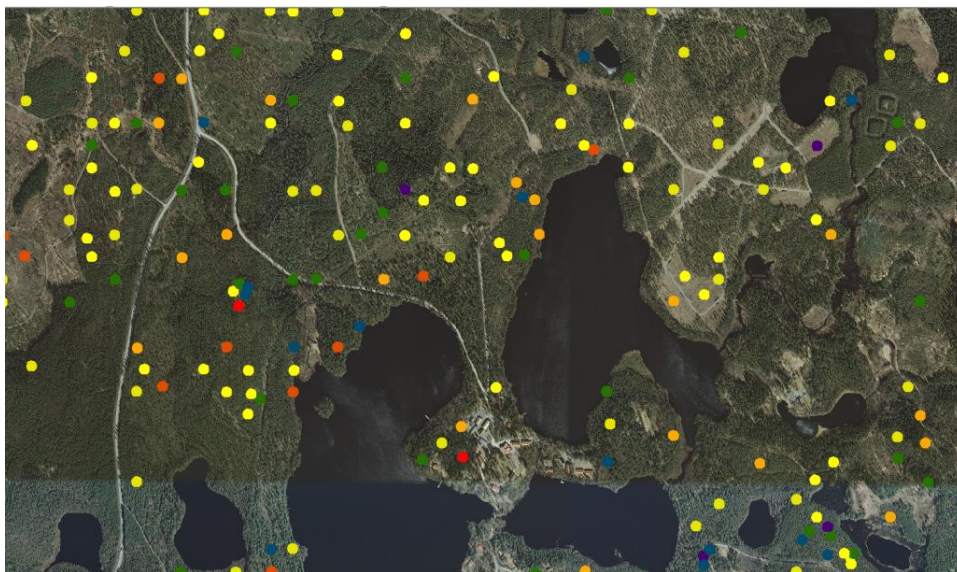
Koealakohtaisiin tilavuuksiin keskittyvässä tutkimuksen osassa karsittiin tai nolla-arvon saivat samat maastopääryhmät kuin edellä kuviokohtaisessa osiossa.

Koealat leikattiin niiden peittoalueen hilaruuduilla. Yksittäisen hilaruudun puustotilavuus laskettiin vastaamaan pinta-alaa, jolla osa 300 neliömetrin maastokoealasta sijoittuu ruudun geometrian alueelle. Yhteen laskemalla näiden osahilaruutujen tilavuusarvot, saatiin vertailukelpoinen laservastine maastomitatulle referenssikoealalle.



Kuva 7. Ympyräkoealoilla leikatut hilaruudut.

Mallintamalla ja maastomittauksin tuotetut vastinkoealakohtaiset tilavuuden erotukset visualisoitiin jälleen kartalle liukuvärein. Tilavuuksia verrattiin koealan reaalipinta-alaisesti sekä hehtaarisolulle laajennettuna.

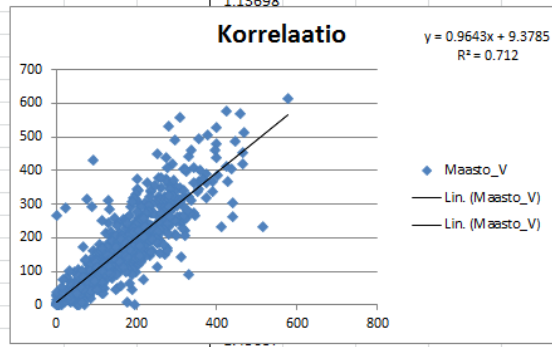


Kuva 8. Referenssikoealojen maastomitatun ja laseraineistosta mallinnetun tilavuuden välinen erotus on havainnollistettu liukuvärein. Tummat värit kuvaavat suurta tilavuuden eroa ja vaaleat tilavuuksien yhdenmukaisuutta.

Koealakohtaisessa vertailussa mukana oli kaikkiaan 690 koealaa Evon opetusmetsän alueelta. Tulosten arvioinnissa käytettiin samoja työkaluja kuin kuvioiden vertailussa. Myös koealajoukosta rajattiin pois taimikoissa ja osin myös nuorissa kasvatusmetsissä sijaitsevia koealoja. Tällä kertaa ei käytetty ainoastaan tilavuustekijää, vaan rajausta määräytyi puuston tilavuuden ja pituuden mukaan. Ulkopuolelle jäivät koealat, joiden tilavuus jäi keskimäärin alle 20 m³/ha ja toisessa rajauksessa alle 9 metrin keskimääräiseen pituuteen.

Kaikkien tutkittujen koealojen yhteenlasketun puuston tilavuuden keskiarvo on huomattavasti korkeampi kuin kuviotason tarkastelussa. Maastomittauksien tulokset ovat myös laseranalyysin antamia arvoja korkeampia, toisin kuin kuviovertailussa. Lasermitattu tilavuuden keskiarvo on 169,6 m³/ha ja maastomitattu 172,9 m³/ha. Koealakohtaisten mittaustapojen tulokset korreloivat toisiaan heikommin kuin kuviokohtaisten mutta silti selitysaste on 71,2 %. Otannan kappalemäärän vähetessä karsitun koealajoukon korrelointi ja harhaisuus heikkenevät. Parhaimmillaan harha on -0,005, kaikki koealat käsittävässä joukossa. RMSE % on jopa yli 10 prosenttiyksikköä parempi kuin kuviotarkastelussa. Trendinä on looginen pienimmän joukon parempi arvo. Parhaimmillaan RMSE % on 33,1 koealajoukossa joka sisältää vain kohteet joissa puuston keskimääräinen hehtaarikohtainen tilavuus on enemmän kuin 20 m³.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1					Laser				Maasto				
2	Koeala	Laser_V	Maasto_V		V_stand	Keskiarvo	Keskihajo	Variaatio	V_stand	Keskiarvo	Keskihajo	Variaatio	Kerroin
3	314	464.151	455.225		3.01257	169.557	97.7883	0.57673	2.52656	172.878	111.751	0.64642	
4	435	76.7873	313.813		-0.94868				1.26115				
5	440	142.274	147.488		-0.279				-0.2272				
6	441	164.493	170.208		-0.05179				-0.02389				Korrelaatiokerroin
7	458	263.683	273.881		0.96255				0.90382				0.84379
8	459	221.65	207.867		0.53272				0.31309				
9	460	104.411	92.6943		-0.66619				-0.71752				
10	465	183.347	142.184		0.14102				-0.27467				
11	466	196.462	162.005		0.27513				-0.09729				
12	482	259.083	299.937		0.91551				1.13698				
13	484	254.943	321.268		0.87317								
14	486	165.351	111.244		-0.04301								
15	487	171.911	228.398		0.02408								
16	489	171.286	132.878		0.01768								
17	490	236.157	275.653		0.68106								
18	505	280.861	274.042		1.13822								
19	507	274.972	255.555		1.07799								
20	511	307.572	310.322		1.41137								
21	513	234.108	147.541		0.66011								
22	514	239.946	162.378		0.71981								
23	529	177.349	211.675		0.07969								
24	532	230.31	290.73		0.62127								
25	541	411.516	234.474		2.47431								
26	557	129.986	165.604		-0.40465								
27	558	14.2704	10.1267		-1.58799								
28	559	187.183	210.114		0.18025				0.33321				



Taulukko 4. Koealakohtaisen vertailun Excel-taulu, (kaikki koealat).

	RMSE						BIAS			
Koeala	Erotus	Erotus^2	Summa	Keskiarvo	RMSE	RMSE%	Erotus	Summa	Keskiarvo	Harha
314	8.92609	79.6751	2497854	3620.08	60.1671	34.8032	8.92609	-2291.69	-3.32129	-0.00481
435	-237.026	56181.4					-237.026			
440	-5.21427	27.1886					-5.21427			
441	-5.71545	32.6664					-5.71545			
458	-10.1986	104.011		172.878			-10.1986			
459	13.7835	189.985					13.7835			
460	11.7168	137.284					11.7168			
465	41.1634	1694.43					41.1634			
466	34.4563	1187.23					34.4563			
482	-40.8541	1669.06					-40.8541			
484	-66.3248	4398.98					-66.3248			
486	54.1079	2927.67					54.1079			
487	-56.4868	3190.75					-56.4868			
489	38.4077	1475.15					38.4077			
490	-39.4959	1559.93					-39.4959			
505	6.81901	46.4989					6.81901			
507	19.4174	377.033					19.4174			
511	-2.74917	7.55796					-2.74917			
513	86.5674	7493.91					86.5674			
514	77.5681	6016.81					77.5681			
529	-34.3254	1178.23					-34.3254			
532	-60.4199	3650.57					-60.4199			
541	177.041	31343.6					177.041			
557	-35.6173	1268.6					-35.6173			
558	4.14379	17.171					4.14379			
559	-22.9314	525.847					-22.9314			

Taulukko 5. Koealakohtaisen vertailun RMSE- ja BIAS-arvot, kaikki koealat).

Koealakohtainen vertailu Evon opetusmetsän alueella		
Kaikki koealat		
	Laseraineisto	Maastomitattu
Puuston kokonais-tilavuuden keskiarvo	169,6	172,9
Keskihajonta	97,8	111,8
Variaatiokerroin	0,58	0,65
RMSE	60,2	
RMSE%	34,8	
BIAS	-0,005	
Selitysaste	71,2	
Koealakohtainen vertailu Evon opetusmetsän alueella		
Koealat yli 20m3/ha		
	Laseraineisto	Maastomitattu
Puuston kokonais-tilavuuden keskiarvo	178,9	183,8
Keskihajonta	93,2	106,8
Variaatiokerroin	0,52	0,58
RMSE	60,9	
RMSE%	33,1	
BIAS	-0,008	
Selitysaste	67,9	

Koealakohtainen vertailu Evon opetusmetsän alueella		
Koealat, pituus >9m		
	Laseraineisto	Maastomitattu
Puuston kokonais-tilavuuden keskiarvo	179,2	183,2
Keskihajonta	93	107,7
Variaatiokerroin	0,52	0,59
RMSE	61,7	
RMSE%	33,7	
BIAS	-0,006	
Selitysaste	67,5	

Taulukko 6. Koealakohtaisen vertailun tulokset. Kaikki koealat, koealat joiden pituus yli 9m ja koealat yli 20m3/ha.

Taulukko 7. Maastokäynnin havainnot referenssikoealoilla.

Koealanumero Sijainti, KKJ	Laseranalyysi m3/ha	Maastomittaus m3/ha	Havainto
9629 3399539, 6788720	130	311	Hakattu -> kapeat latvukset
9083 3397750, 6789322	274	437	Hakattu -> kapeat latvukset
11973 3398475, 6787874	131	285	Hakattu -> kapeat latvukset
541 3400505, 6788499	411	234	Lehtipuuta, järeää puustoa
3046 3399003, 6788491	439	264	Lehtipuuta
2601 3397565, 6789460	189	47	Luonnontuho
4381 3398810, 6788183	250	112	Lehtipuuta
9134 3397299, 6790223	277	169	Järeää puustoa

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Saatujen tulosten epätarkimmat ääripäät poikkesivat erittäin paljon toisistaan, niin kuvioiden kuin koealojen osalta. Tämän vuoksi näimme tarpeelliseksi käydä maastossa arvioimassa, niin maastomittausten kuin laseraineiston tarkkuutta ja paikoittaisen epätarkkuuden syitä. Maastokäynnit kohdistettiin valikoiduille metsikkökuvioille ja vastinkoealoille.

Merkittävin syy on suhteellisen pitkä aikajänne, jolla tietoja käsitellään ja tarkastellaan. Jotkin tuloksia vääristävät tekijät oli helppo tunnistaa. Kuviotietoja on kasvatettu metsäsovelluksella useita vuosia ja tehtyjen hakuiden poistumat eivät välttämättä ole tarkasti kirjautuneet järjestelmään.

Pieni osa kuvioista on myös osunut aikaikkunaan, jolloin kuvio on hakattu juuri ennen tai jälkeen kesällä suoritettun laserkeilauksen. Lisäksi suurimpia tilavuuseroja tuottivat luonnontuhoalueet.

Muita spekulatiivisia virheitä tuottavia ominaisuuksia olivat Evon alueen mikrokuviointi eli metsätalousalueelle epätyypillisen pienialaiset metsäkuviot, useampi kuin yksijaksoiset metsiköt, Evon alueelle tyypilliset ikääntyneet männyt, kapeat latvukset harvennuksen jälkeen, lehtipuuosuus ja lehtipuuvaltaiset alueet sekä inhimilliset virheet.

Maastotarkastelun tuloksena arvioimme laseraineiston antavan todellisuutta suuremmat tilavuusarvot suuren lehtipuuosuuden ja vanhojen tasalatvaisten mäntyjen, kuten ylispuumänniköiden alueille. Tähän johtaa puiden leveät ja tuuheat latvukset, jotka laserkeilauslaitteen lähettämät signaalit kohtaavat korkeammalta tuottaen vastakaiut nopeammin. Tällöin tavallista pienempi osa kaiuista muodostuu alemmasta latvuksen osasta, nuoremasta puuston jaksosta tai maakosketuksesta (taulukko 1, 20).

Koealoja tarkastellessa selvitimme tarkemmin inhimillisen virheen osuutta suorittamalla tarkastusmittauksia muutamilla koealoilla. Nämä kolme koealaa olivat puustoltaan tavanomaisia, joiden hoidossa on noudatettu hyvän metsänhoidon suosituksia. Missään näistä kolmesta koealasta ei ollut päälle näkyvää yksiselitteistä virheominaisuutta. Puuston tilavuus laskettiin yksinpuin lukien. Kaikki 3 koealaa sijaitsivat O3 kehitysluokan normaali-puustoisilla kuvioilla, joilla oli useampaa kuin yhtä puulajia. Näiden kolmen maastomitatun ja laseranalyysin tuottamien tilavuuksien erotus oli 165 m³/ha.

Jokaisen kohteen maastossa suoritettu tarkastusmittaus johti tilavuuksien erotuksen vähenemiseen. Näiden 2 mittausmenetelmän välinen virhe supistui keskimäärin 22 %, vaihteluvälinä 7 % - 33 %. Tulokset olivat hyvin yksisuuntaisia eli jokaisessa kohteessa erotus pieneni. 22 % voidaan pitää merkittävänä virheen osuutena, verrattain tarkkojen alkuperäisten tulosten vierellä. Tosin ero oli yhä varsin merkittävä, 118 m³/ha. Koealojen tarkastusotannon ollessa näin suppea, voisi olla aiheellista tutkia tämän virheen loogisuutta laajemmin, jotta toimintaa saadaan tulevaisuudessa kehitettyä. Mittauksia suorittavien työharjoittelijoiden ammattiosaamista on tulevaisuudessa syytä vahvistaa tässä nimenomaisessa työlaajissa työsuhteen alussa annettavalla lisäkoulutuksella.

LÄHTEET

Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. n.d. Lasermittaukset metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopisto.

Joensuu, M. 2013. Männyn (*Pinus Sylvestris*) laatutunnusten estimointitarkkuus maastolaserkeilausaineistosta
Helsingin yliopisto. Metsätieteiden laitos.
Metsävaratieteen ja -teknologian pro gradu –tutkielma, 23-24.

Kangas, A., Päivinen, R., Holopainen, M. & Maltamo, M. 2004. Metsänmittaus ja kartoitus. *Silva Carelica* 40. Joensuu: Joensuun yliopistopaino, 121-122.

Metsäntutkimuslaitos. n.d. Valtakunnan metsien inventointi (VMI). Viitattu 21.8.2013.
<http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/info.htm>

Viitala, R. 2012. Metsänarvioinnin kehittäminen. Teoksessa Hokka, T., Häkkinen, I., Kolkka, M., Korhonen, P., Lindberg, H., Sipilä, A., Viitala, R. & Vuori, P. (toim.). *Evo 150 – Metsän opetuksia*. Hämeenlinna. Tammerprint Oy, 111-118.

Ärölä, E. 2008. Metsävarojen mittaus ja arviointi. Teoksessa Rantala, S. (toim.) *Tapion taskukirja*. Helsinki. Kariston Kirjapaino Oy, 271-316.